不同灌水梯度下沙棘液流特征与环境因子的关系

王卓[1]，郭月峰[1*]，祁伟[1,2]，姚云峰[1]，仲宸[1]，刘璐[1]，王佳坤[1]

（1. 内蒙古农业大学沙漠治理学院，内蒙古 呼和浩特 010011；

2. 内蒙古自治区水利水电勘探设计院，内蒙古 呼和浩特 010020）

摘要：以砒砂岩为母质发育的栗钙土作为供试土壤，沙棘作为供试树种，基于茎热平衡法（SHB）在温室内研究不同灌水梯度下 T1（田间持水量 θ_{FC}25%）、T2（θ_{FC}40%）、T3（θ_{FC}55%）沙棘液流速率变化特征。采用 HOBO 小型气象站监测环境因子，研究沙棘液流速率对环境因子的响应关系。结果表明：① 沙棘液流速率除明显的昼夜变化外，还伴有“光合午休”现象，液流变化曲线呈双峰形；② 沙棘液流速率与土壤含水率呈正比，液流速率和日累积量为 T1＜T2＜T3，其中，T2 和 T3 差距较小；③ 沙棘液流速率与光合有效辐射、空气温度呈正相关，与空气湿度呈负相关；不同灌水梯度下液流速率与各环境因子的相关性绝对值表现为 T1＜T3＜T2。回归方程 R^2 表现为 T1＜T3＜T2。T2 梯度下沙棘液流速率处于较高水平，对环境因子响应程度最高，温度是影响沙棘液流速率变化的主导因子。

关键词：砒砂岩；沙棘；液流速率；灌水梯度；环境因子；内蒙古

黄土高原地区分布着大量名为“砒砂岩”的松散岩层，砒砂岩是由厚层砂岩、砂页岩和泥质砂岩组成的岩石互层[1]，其特点是无水坚硬如磐石，有水则松软如烂泥，遇风则风化剥蚀[2]，导致该地区地形支离破碎，水土流失程度极为严重。水资源是黄土高原地区植物生长的重要影响因子，而植物生长利用水资源主要体现在蒸腾作用，其中 99.8%以上的水分通过蒸腾作用散失到空气中，树干液流量在很大程度上反映了植物的蒸腾耗水能力[3]。为此研究适生植被的蒸腾耗水特性和水分利用规律，探明水分和植物生长的供需关系，是黄土高原地区生态植被建设亟待解决的问题。砒砂岩区土层较薄且降水量不足，致使植物扎根困难造成大面积死亡，同时存在“小老树”等生态退化的现象，对生态恢复重建以及水资源优化利用造成不同程度的负面影响。在有限的水资源条件下，采用大面积种植恢复生态的方法已不可取，探明现有适生树种的水分利用状况和水分耗散特征对砒砂岩区生态建设的可持续发展具有重大意义。

沙棘（*Hippophae rhamnoides*）胡颓子科沙棘属，落叶性灌木，其特性是耐旱、抗风沙，可以在盐碱地上生存[4]，沙棘根系的根瘤放线菌能固定土壤中的氮素促进生长，提高土壤肥力，沙棘对土壤速效氮的增加最为明显[5]。胡建忠等[6-8]研究表明，沙棘的根系呈逐级分叉和迂回的生长趋势，主要分布在 35 cm 土层以内，沙棘根系较强的穿透能力使其能够穿透坚硬的砒砂岩抵达疏水层，较其他植物更加容易获取水分。近年来，通过热扩散法测定液流速率来反映植被水分条件状况及其与环境因子关系研究报道较多，以砒砂岩为母质发育的栗钙土为基质研究植被水分耗散特征却鲜有报道。针对砒砂岩区水资源不足的问题，从选择低耗水植株加强砒砂岩区生态治理的角度出发，基于温室监测适生植株液流特征，分析沙棘在不同水分胁迫条件下的水分耗散特征及其对环境因子的响应，以期揭示砒砂岩地区沙棘水分运营的变化特征以及植株维持正常生长需求的耗水量等问题，为当地林分管理和有效利用水资源提供科学指导。

收稿日期：2019-10-06 修订日期：2020-04-21

基金项目：国家自然科学基金项目（31500584）；内蒙古农业大学优秀青年科学基金培养项目（2017XYQ-3）；内蒙古自然科学基金项目（2018MS03019）；内蒙古自治区“青年科技英才支持计划”项目（NJYT-17-B19）

作者简介：王卓（1995-），男，硕士研究生，研究方向为水土保持与荒漠化防治. E-mail：18447055013@163.com

通讯作者：郭月峰. E-mail：guoyuefeng0525@126.com

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验于 2018 年 6—8 月在内蒙古农业大学重点实验室日光温室内进行。试验地位于40º41′30"N，111º22′30"E，海拔 1040 m，属蒙古高原大陆性气候，年平均气温 6.7 ℃，多年平均降水量 335～535 mm，主要集中在 7—8 月。于 2017 年 4 月初在内蒙古鄂尔多斯市砒砂岩水土保持示范区取回原状土（以砒砂岩为母质发育的栗钙土），根据文献报道并结合实地调查发现，3～5 a 生的沙棘根系集中分布在 0～50 cm 土层中，本研究选择典型地段，取50 cm×50 cm×50 cm 的原状土柱，装入规格为 50 cm×50 cm 的育苗袋带回试验温室，同时将示范区 3～5 a 生沙棘栽植于育苗袋中进行备测。选取育苗袋内已健康生长且长势大致相同的沙棘 9 株，设置 3 组灌水梯度，每组 3 个重复。日光温室中空气温度：20～34 ℃，相对湿度 34%~89%。

试验取样时间为 2017 年 4 月，为保证试验可进行长期观测避免植物死亡，试验于 2017 年 4 月—2017 年 10 月进行试验准备且保证植物成活。供试砒砂岩土壤基本性质与物理参数见及供试树种基本参数见表 1～表 3。

表 1 供试土壤基本性质

Table.1 Basic properties of the tested soil

土壤有机质 /(g·kg^{-1})	pH	速效氮 /(mg·kg^{-1})	速效磷 /(mg·kg^{-1})	速效钾 /(mg·kg^{-1})
3.79	9.06	18.92	3.95	40.67

表 2 供试土壤物理参数

Table.2 Soil physical parameters

样品容重 /(g·cm^{-3})	土壤机械组成/(%)			
	黏粒（<0.002mm）	粉粒（0.002~0.02mm）	砂粒（0.02~2.00mm）	砾石（>2.00mm）
1.41	0.27	46.61	53.12	0

表 3 供试树种基本参数

Table.3 Basic parameters of test species

处理	株高/cm	冠幅（东西）	冠幅（南北）
	125	28	25
T1	128	34	23
	123	36	27
	129	31	23
T2	122	36	27
	125	33	26
T3	124	30	28

	127	29	25
	125	30	32

1.2 试验设计

环刀法测得田间持水量为 2.5 L；试验设 3 个水分处理，T1：θ_{FC}（田间持水量）25%（灌水量 0.63 L）；T2：θ_{FC} 40%（灌水量 1 L）；T3：θ_{FC} 55%（灌水量 1.38 L）；T1:砒砂岩地区栗钙土的萎蔫湿度约为 5.5%[9]。Orgaz 等[10]得出温室内潜在蒸发蒸腾量为温室外的 60%~80%，根据试验的条件限制和地区的差异，在萎蔫湿度与生长阻滞湿度范围内设置重度胁迫灌水量：θ_{FC}25%；T2：根据文献[11-13]对黄土高原地区土壤含水量的研究表明，其深层土壤稳定湿度约相当于田间持水量的 49%~54%，相当于土壤含水率的 9%~11%，处于难效水区间段；模拟土壤深层稳定湿度，设置中度胁迫灌水量：θ_{FC}40%；T3:砒砂岩地区自然条件恶劣，土壤含水率低于中效水[9]；为满足室内对野外的指导意义，探明充分灌水下和干旱胁迫下液流速率的差异，设置轻度胁迫灌水量：θ_{FC}55%。

土壤水吸力是土壤水势的强度标志。土壤水吸力越大，土壤含水量越低；土壤水吸力越小，土壤含水量愈多，所以，土壤张力指标能体现出土壤的含水情况[14]。设定 0.03 MPa 为灌水下限，每天早晚共观察 2 次，当张力计表盘读数大于等于 0.03 MPa 时，表明土壤含水量达到萎蔫湿度（约 4.56%），需要给植株灌水，灌水时间控制在 18：00 后，避免过度水分耗散。

1.3 试验方法

1.3.1 茎干液流测定

使用 EMS62 便携式双通道植物液流监测仪，由双通道数据采集器和 EMS62 植物液流测量模块组成完整的包裹式植物液流测量系统。本试验测量原理是基于茎热平衡法（SHB），其中茎部热平衡法是指将一个加热套裹在茎或枝条外面，连续加热树皮、木材和树液，茎表面的温度通过安装在周围的温度传感器来感应，EMS62 的传感器有两种型号，分别是 8~12 mm 的小型传感器，12~16 mm 的大型传感器，为减少实验误差应根据树干粗细选择合适的传感器。安装传感器前，应选择合适的树干并清除其表面粗糙树皮露出内层树皮后，用直径为 2 mm 的电钻钻头钻出两个长 20 mm 并尽量平行的孔。将探头分别插入钻孔内并避免内部损伤。探头安装后，用探头外侧的铝箔包裹，并用黑胶带密封。液流仪器每 30 min 收集一次数据，每天 24 h 连续监测，以平均每小时的数据进行分析[15]。

依据热量平衡原理求出被液流带走的热量来计算茎杆内液体的流量[16]；与热脉冲速度法相比，其最大的两个特点：一是其无需标定，二是无需将温度探头插入茎杆中，因而可以直接得到测定结果，并且可以在一个植株上长时间的定点测量而对植株几乎没有损伤[17-18]。

具体公式如下：

$$P = Q \times dT \times C_w + dT \times z \qquad (1)$$

式中：P 为热输入功率(W)，Q 为液流速率（$kg\cdot s^{-1}$），dT 为测量点的温度差，C_w 为水的比热容（$J\cdot kg^{-1}\cdot K^{-1}$），z 为测量点的热损失系数。当植物茎秆中的水分流过加热部分温度将上升，通过实际的功率和茎秆水分温度的上升可以计算出液流量。

1.3.2 气象观测

在温室空地中布设美国 HOBO 小型气象站。需要测定的环境因子有：光合有效辐射 *PAR*，$W\cdot m^{-2}$；空气温度 *Ta*，℃；空气相对湿度 *RH*，%；温室内通风较小，并以盆栽方式栽植沙棘，故暂不考虑风速和地温等因素；环境因子监测与液流速率测定 24 h 同步进行，每 30 min 自动采集记录数据，以每小时的数据取平均值进行分析。

1.4 数据分析

数据分析采用 Excel 2016 和 SPSS 22.0 进行相关性分析和逐步回归分析。

2 结果与分析

2.1 不同灌水梯度下连日沙棘液流速率变化规律

连续 7 d（8 月 8 日～8 月 14 日）沙棘液流速率日变化呈明显的昼夜变化，同时沙棘液流速率日变化曲线均为双峰形（图 1）。随着太阳辐射加强，温度升高，液流速率持续上升，大气水气压亏缺的增大，引起气孔导度下降，产生“光合午休”现象，导致液流速率于中午时分减缓，呈现“双峰”趋势，而后太阳辐射降低，沙棘液流速率减缓，夜间液流速率保持不为“0”的稳定变化。不同灌水梯度下，沙棘液流速率存在明显差异，整体表现为 T1<T2<T3。单一梯度内，随着土壤水分的消耗，沙棘液流速率也逐渐降低，于 8 月 11 日灌水后，各梯度液流速率均呈逐步上升趋势，沙棘液流速率与土壤含水率呈正相关。随着土壤含水量的不断消耗，沙棘无法补充到足够的水分，致使液流速率降低，峰型逐渐变小，于变化节点（8 月 11 日）进行灌水后，随着土壤含水率的升高，液流速率也随之上升。不同灌水梯度下日沙棘液流速率差异更加显著，T3 与 T2 梯度峰形变化幅度明显，T1 梯度下沙棘长期处于重度干旱胁迫，灌水后液流速率依旧处于较低水平。分析其原因：当土壤含水量在凋萎系数范围内时，土壤基质势较低、土壤吸力相对较大，植物根系难以从土壤中吸水，因此，液流速率受到制约，生理活性明显降低[19]。

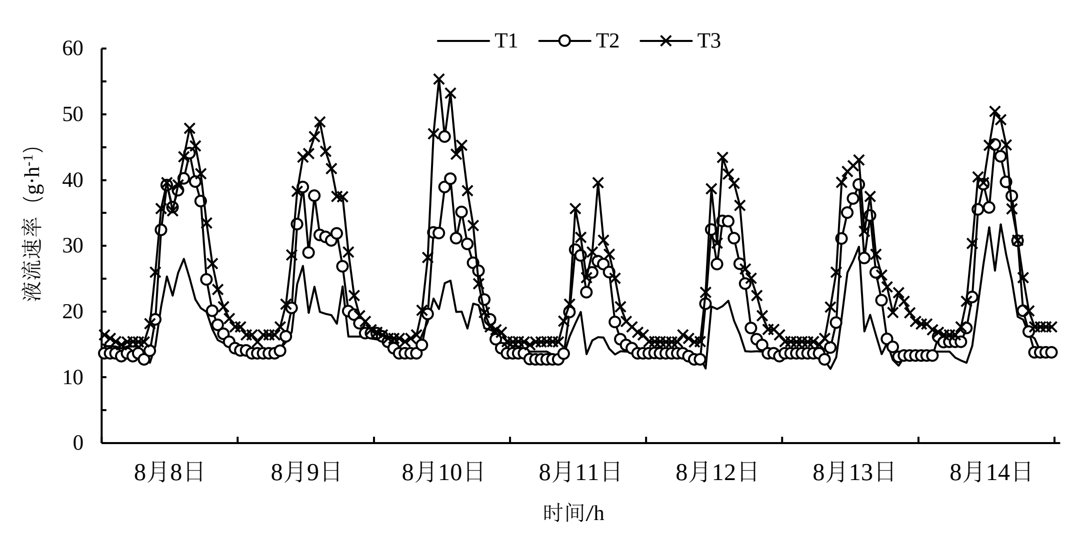


图 1 8 月连日液流速率

Fig.1 Stalk flow rate in August

2.2 不同灌水梯度下典型日沙棘液流速率变化规律

如图 2~4 所示，通过不同月份典型日沙棘液流速率变化趋势可以看出，不同灌水梯度下，沙棘液流变化均表现出明显的昼夜变化趋势呈现显著“双峰形”，液流启动时间稳定在 7:00 左右，峰值抵达时间在气温最高峰段的两侧各有分布存在明显的差距，双峰值抵达时间处于在 10:00—14:00，夜间液流速率也较为接近。不同灌水梯度下，典型日液流速率变化表明，随着太阳辐射的加强，气温逐渐升高，导致液流峰值和液流变化趋势越加明显。T3 灌水定额最高，液流速率一直维持在较高水平。T2 液流速率变化明显，6 月液流峰值为 36.41 $g·h^{-1}$，直至 8 月液流峰值上升至 45.37 $g·h^{-1}$，液流速率提高了 20%。T1 灌水定额略高于萎蔫湿度，液流速率处在较低水平。6 月太阳辐射较低，空气温度较低，不同梯度液流速率差距较为明显；7、8 月份太阳辐射升高，空气温度显著增加，3 种不同灌水梯度下的液流速率差距降低，T2 梯度液流变化趋势和变化幅度接近 T3 梯度。在不同灌水梯度下，沙棘液流速率表现为 T1<T2<T3。不同灌水梯度下，生长季内各月份沙棘液流速率动态变化存在明显差异。

T3 梯度下的液流速率在启动时间上滞后于 T1、T2 梯度，抵达峰值时间滞后于其他梯度约 30 min 左右。除 7、8 月外，T1 梯度无显著的“光合午休”现象。也就是说双峰曲线体现度不够，同时液流峰值较低，9、10 月份的液流峰值不足其他梯度的二分之一，晚间液流速率 T3 明显高于其他梯度，说明土壤含水量越高，日间蒸腾耗水越大，植株在夜间通过根压吸水则越发显著，从而弥补白天体内大量的水分耗散。T2 较 T3 梯度来说，各月份液流无论是从启动时间、峰值等方面来看二者液流变化趋势相近，表面沙棘具有很强的干旱适应性，然而在温度较高的 8 月份，T2 比 T3 在液流峰值上略低，说明液流速率与土壤含水量呈正比。虽然沙棘能够通过调节自身系统具有较强的干旱适应性，但在长期的重度水分胁迫下（T1），其生理机制等方面会受到严重损坏，沙棘液流速率显著降低，表明沙棘耐旱性具有一定限度。

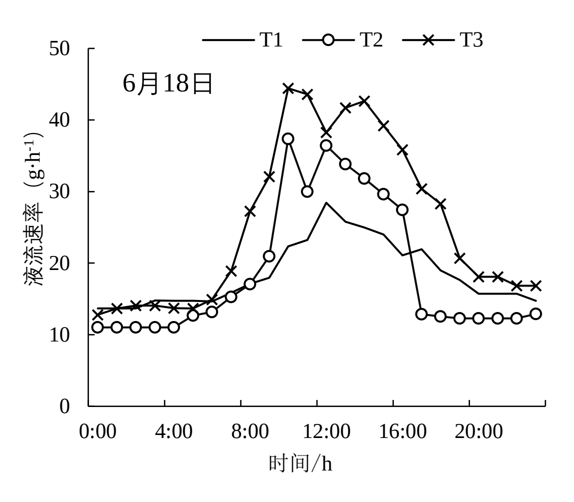


图 2 6 月典型日液流速率

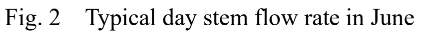


Fig. 2 Typical day stem flow rate in June

图 3 7 月典型日液流速率

Fig.3 Typical daily stem flow rate in July

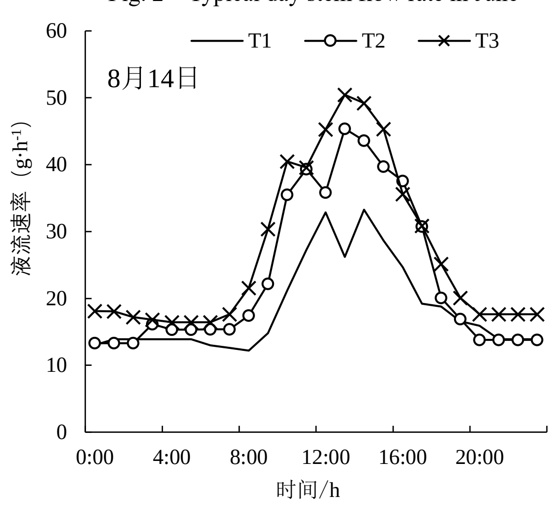


图 4 8 月典型日液流速率

Fig. 4 Typical daily stem flow rate in August

选取 8 月 14 日为典型日分析。8 月典型日沙棘液流累积量表现为 T1<T2<T3（图 5）。不同灌水梯度下沙棘液流日累积变化均呈“S”形曲线，且液流日累积量与灌水量呈正相关。至 07:00 前，液流日累积曲线斜率不变，8:00—11:00，曲线斜率开始增大，至 13:30—14:30，曲线斜率升高至极限，随后开始降低，至 20:00—21:00 曲线斜率基本无变化趋势。这与以上分析沙棘日变化规律相吻合。从图 5 可以看出，T2 与 T3 的曲线较为接近，T1、T2 和 T3 下沙棘液流日累积量分别为 441 g、556 g 和 641 g。

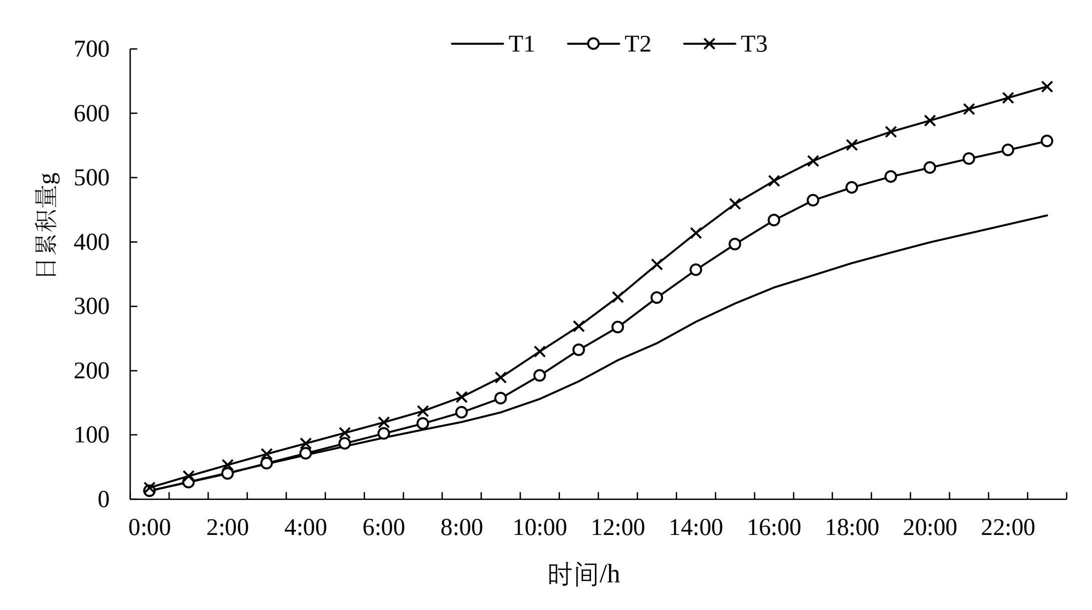


图 5 不同灌水梯度下 8 月典型日液流累积量

Fig. 5 Typical daily sap accumulation in August under different irrigation gradients

6 月选取 7 d（6 月 12 日—6 月 18 日）与 7 d 选取 7 天（7 月 18 日—7 月 24 日）的沙棘连日液流速率变化规律与 8 月 7 d（8 月 8 日—8 月 14 日）总体趋势均保持一致，不同月份下（6 月—8 月）不同灌水梯度液流速率如表 4 所示；其实测值围绕平均值的变化范围较小，试验数据可靠。

表 4 6—8 月不同灌水梯度下液流速率比较

Table.4 Comparison of sap flow rate under different irrigation gradients from June to August

处理	样本容量	最大值	最小值	平均值/ (g·h^{-1})	标准误	标准偏差
TI	504	33.27	11.28	17.10	0.19	4.25
T2	504	45.37	11.03	19.43	0.36	8.09
T3	504	55.32	10.70	23.43	0.44	9.98

2. 3 不同灌水梯度下沙棘液流速率与环境因子的关系

2. 3. 1 沙棘液流蒸腾速率与环境因子的相关性

对不同灌水梯度下沙棘液流速率与同时段环境因子的连日变化数据（8 月 8 日—8 月 14 日）进行分析，得到各环境因子对不同灌水梯度下沙棘液流速率的影响程度。结果显示，沙棘液流速率与光合有效辐射、空气湿度等环境因子有显著的相关关系，相关系数见表 5；表明沙棘液流速率与光合有效辐射、空气温度呈正相关，而与空气相对湿度呈负相关。由各环境因子的绝对值可知，各环境因子对沙棘液流速率的影响程度依次为：光合有效辐射＜空气湿度＜空气温度。由表 5 可知，温度是影响沙棘液流速率的主导因子，不同灌水梯度下液流速率与环境因子的相关性均表现为 T1<T3<T2。

表 5 不同灌水梯度液流速率与环境因子相关系数

Table.5 Coefficient between stem flow rate and environmental factors in different irrigation level

梯度	光合有效辐射/W • m^{-2}	温度/℃	空气湿度/%
T1	0.689**	0.826**	-0.780**
T2	0.711**	0.899**	-0.873**
T3	0.702**	0.887**	-0.881**

注：以上相关性水平均是在 P＜0.01 水平下。

2. 3. 2 沙棘液流速率与环境因子的回归分析

为更明确环境因子对不同灌水梯度下沙棘液流速率的综合影响，使用逐步删除法进行多元分析。以不同灌水梯度的液流速率为因变量，太阳辐射、空气湿度、空气温度等环境因子为自变量进行分析；回归方程：$V_{T1}=-2.35+0.005X_{PAR}+0.706X_{Ta}$，决定系数 R^2=0.721；$V_{T2}=-2.259+0.01X_{PAR}+1.118X_{Ta}-0.135X_{RH}$，决定系数 R^2=0.841；$V_{T3}=20.92+0.012X_{PAR}+0.868X_{Ta}-0.298X_{RH}$，决定系数 R^2=0.832；变量系数的显著性概率均为“0.00”；式中：V 为液流蒸腾速率，$g·h^{-1}$；Ta 为空气温度，℃；PAR 为光合有效辐射，W • m^{-2}；RH 为空气湿度，%；不同灌水梯度下液流速率与环境因子的回归方程决定系数表现为 T1＜T3＜T2。

3 讨论

不同灌水梯度下沙棘液流表现出明显的昼夜变化特征，其变化为明显的双峰形；早间液流速率随着气温和太阳辐射的升高而上升，同时液流速率变化滞后太阳辐射约 30 min，总体呈正相关，这与刘龙等[20]对准格尔旗暖水乡北部圪秋沟流域内沙棘的蒸腾耗水研究一致。中午时分太阳辐射达峰值，植物蒸腾达到阈值，为减少自身水分耗散，关闭叶片气孔，控制水分流失[21]，导致液流速率下降，产生“光合午休”现象[22]。夜间光合作用停止，蒸腾速率也远远低于白天，但植物为补充树体内的水分亏缺，由于根压作用，水分以主动方式进入植株体内，来补充白天植物蒸腾失去的水分，恢复植物体内的水分平衡[23]，夜间液流速率保持不为“0”的稳定变化。无论从单一梯度下随时间推移，还是不同梯度下同期液流速率比较来看，土壤含水率与液流速率呈正比，沙棘液流速率表现为 T3>T2>T1。但水分胁迫并不改变沙棘的生长节律，同时 T2 在中度水分胁迫下具有较高的液流速率，表明沙棘在适度的干旱下，能够提高沙棘的耐受性。

树干液流的影响因素众多，主要包括树木自身生物学特性、土壤供水水平以及气象因素 3 个方面，生物学特性决定树干液流的潜在能力，土壤供水状况决定树干液流的总体水平，气象因素决定树干液流的瞬间变化[24]。同时，树木蒸腾耗水影响和调控机制的复杂性与相对性，除自身特性外，与环境因子也有着密切联系。以往研究表明，由于地理位置、环境因子、时间尺度以及季节等因子的不同，即使处于同一生境中的同一物种，各环境因子对树干液流的影响差异也很大[25]。王文杰等[26]研究认为，在小时尺度上，兴安落叶松树干液流主要影响因子是光照和空气湿度；在日尺度上，其主要影响因子是土壤温度、光照和空气温度；在月尺度上，土壤温度和土壤湿度是主要影响因素。本研究对单日以及月尺度下的液流影响因子研究表明，整体上沙棘液流速率与光合有效辐射、空气温度呈正相关，与空气湿度呈负相关。其中，各梯度下沙棘液流速率与空气温度的相关性最高，这与李宏等[27]在不同灌水量下幼龄枣树液流变化的结论相一致。单日尺度下沙棘液流与环境因子和土壤含水率的相关性也呈正比。另外，在月尺度下沙棘树干液流与环境因子的相关系数基本呈现先升高后降低的趋势，6 月—8 月逐步升高，说明沙棘在生长季的耗水除环境因子变化外，也取决于自身的物候期

特性。综上所述，沙棘的蒸腾耗散与环境因子的响应机制是以某一特征为主导，与其他因子综合作用而产生，不同灌水梯度下，沙棘液流速率与环境因子的影响程度均表现为 T2＞T3＞T1。

4 结论

（1）沙棘液流速率除明显的昼夜变化外，还伴有“光合午休”现象，液流变化曲线呈“双峰形”。(2)沙棘液流速率与土壤含水率成正比，沙棘液流速率表现为 T1＜T2＜T3。(3)不同灌水梯度下沙棘液流速率与光合有效辐射、空气温度呈正相关，与空气湿度呈负相关；沙棘液流速率与各环境因子的相关性表现为 T1＜T3＜T2；回归方程决定系数 R^2 表现为 T1＜T3＜T2 。

砒砂岩区无法满足灌溉条件，同时在降水量不足以及地下水无法补充的情况下，T2 梯度下沙棘液流速率处于较高水平，对环境因子响应程度最高，同时，温度是影响沙棘液流速率变化的主导因子。

参考文献

[1] 王愿昌,吴永红,寇权,等.砒砂岩分布范围界定与类型区划分[J].中国水土保持科学,2007,5(1):14-18.[Wang Yuanchang, Wu Yonghong, Kou Quan, et al. Definition of arsenic rock zone borderline and its classification[J].Science of Soil and Water Conservation,2007,5(1):14-18.]

[2] 毕慈芬,邰源林,王富贵,等.防止砒砂岩地区土壤侵蚀的水土保持综合技术探讨[J].泥沙研究,2003,3(14):63-65. [Bi Cifen, Tai Yuanlin, Wang Fugui, et al. Probe to integrated soil conservation techniques for soil erosion prevention in soft rock areas[J].Journal of Sediment Research,2003,3(14):63-65.]

[3] 田晶会.黄土半干旱区水土保持林主要树种耗水特性研究[D].北京:北京林业大学,2005.[Tian Jinghui. Studies water consumption characteristics of main tree species of Soil and water conservation forest in semi-arid region on loess plateau[D].Beijing:Beijing Forestry University,2005.]

[4] 张永亮.沙棘根系生物力学特性研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2011.[Zhang Yongliang. Study on biomechanical characteristics of *Hippophae rhamnoides* Linn. roots[D] Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University,2011.]

[5] 吴建峰,林先贵.土壤微生物在促进植物生长方面的作用[J].土壤,2003,35(1):18-21.[Wu Jianfeng, Lin Xiangui. Effects of soil mivrobes on plant growth[J].Soils,2003,35(1):18-21.]

[6] 胡建忠.砒砂岩区种植沙棘后不同时期的景观异质性[J].国际沙棘研究与开发,2012,10(1):12-18.[Hu Jianzhong. Landscape heterogeneity in soft sandstone area in different periods after seabuckthorn planting[J].International *Hippophae rhamnoides* research and development,2012,10(1):12-18.]

[7] 吴永红,胡建忠,闫晓玲,等.砒砂岩区沙棘林生态工程减洪减沙作用分析[J].中国水土保持科学,2011,9(1):68-73.[Wu Yonghong, Hu Jianzhong, Yan Xiaoling, et al. Reduction effects of flood and sediment yield of *Hippophae rhamnoides* Linn forest in soft sandstone area[J]. Science of Soil and Water Conservation,2011,9(1):68-73.]

[8] 胡建忠,刘丽颖,殷丽强,等.砒砂岩区沙棘群落根系层的垂直分布规律[J].防护林科技,2011,(1):15-19. [Hu Jianzhong, Liu liyin, Yin Liqiang, et al. Vertical distribution law of roots for *Hippophae rhamnoides* community in soft sandstone area[J].Protection Forest Science and Technolog,2011,(1):15-19.

[9] 胡梦珺.黄土丘陵沟壑区沙棘、柠条林地水量平衡及土壤水分生态特征[D].杨凌:西北农林科技大学,2003.[Hu Mengjun. Study on water balance and soil moisture ecological characteristic of *Hippophae rhamnoides* and *Caragana Microphylla* in loess hilly region[D]. Yangling: Northwest A&F University,2003.]

[10] Orgaz F,Fernandez M D, Bonachela S,et al. Evapotranspiration of horticultural crops in an unheated plastic greenhouse[J].Agricultural Water Management,2005,72:81-96.

[11] 杨文治,韩仕峰.黄土丘陵区人工林草地的土壤水分生态环境[J].中国科学院西北水土保持研究所集刊(土壤分水与土壤肥力研究专集),1985,(2):18-28.[Yang Wenzhi, Han Shifeng. Soli water ecological environment on the man-made woodland and grassland in loess hilly Region[J]. Collected Papers of Northwest Institute of Water and Soil Conservation, Chinese Academy of Sciences(Symposium on Soil Water Division and Soil Fertility),1985,(2):18-28.]

[12] 刘增文,王佑民.人工油松林蒸腾耗水及林地水分动态特征的研究[J].水土保持通报 ,1990,10(6):78-84.[Liu Zengwen, Wang Youming. Study on transpiration water consumption of artificial *Pinus tabulaeformis* and water dynamic characteristics of forest land[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1990,10(6):78-84.]

[13]李玉山.黄土区土壤水分循环特征及其对陆地水分循环的影响[J].生态学报,1983,3(2):91-101.[Li Yushan. The properties of water cycle in soil and their effect on water cycle for land in the loess region[J].Acta Ecologica Sinica, 1983,3(2):91-101.]

[14] 刘思春,王国栋,朱建楚,等.负压式土壤张力计测定法改进及应用[J].西北农业学报,2002,11(2):29-33.[Liu Sichun, Wang Guodong, Zhu Jianchu, et al. Improvement and application on soil tension meter with negative-pressure mercury[J].Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2002,11(2):29-33.]

[15] 韩兆敏,姚云峰,郭月峰,等.砒砂岩区油松的茎流特征及其与环境因子的关系[J].生态环境学报,2017,26(7):1145-1151. [Han Zhaoming, Yao Yunfeng, Guo Yuefeng, et al. Sap flow characteristics of *pinus tabulaeformis* in soft rock area and its relationship with environmental factors[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017,26(7):1145-1151.]

[16] 罗中岭.热量法茎流测定技术的发展及应用[J].中国农业气象,1997,18(3):52-56.[Luo Zhongling. The development and application of thermal methods for measuring sap flow[J].Chinese Journal of Agrometeorology,1997,18(3):52-56.]

[17] Weibel P F, Boersma K. An improved stem heat balance method using analog heat control[J].Agricultural and Forest Meteorology,1995,75(1):191-208.

[18] Allen S J,Grime V L.Measurements of transpiration from savannah shrubs using sap flow gauges[J].Agricultural and Forest Meteorology,1995,75(1):23-41.

[19] 孙鹏飞.准噶尔盆地南缘主要自然植物的耗水规律及适宜需水量试验研究[D].石河子:石河子大学,2010.[Sun Pengfei. Research on the water consumption rule and water requirement of main desert shrub in southern margin of Junggar basin[D]. Shihezi:Shihezi University,2010.]

[20] 刘龙,姚云峰,郭月峰,等.准格尔旗砒砂岩区沙棘蒸腾耗水与环境因子的关系[J].中国农业大学学报,2018,23(6):108-120.[Liu Long, Yao Yunfeng, Guo Yuefeng, et al. Correlations between the transpiration water consumption of *Hippophae rhamnoides* Linn. and environmental factors in soft sandstone area of Zhungeer[J]. Journal of China Agricultural University2018,23(6):108-120.]

[21] 孙鹏森,马履一,王小平,等.油松树干液流的时空变异性研究[J].北京林业大学学报,2000,22(5):1-6.[Sun Pengsen, Ma Lyuyi, Wang Xiaoping, et al. Temporal and spacial variation of sap flow of Chinese pine(*Pinus tabulaeformis*) [J].Journal of Beijing Forestry University, 2000,22(5):1-6.]

[22] 吾木提汗·卡克木,海利力·库尔班,陈其军,等.盐胁迫条件下骆驼刺与绿豆光合日变化特征及午休现象的成因[J].干旱区研究,2012,29(6):1039-1045.[Umethan Kakem, Halil Kurban,Chen Qijun, et al. Study on daily change and midday depression of photosynthesis of *Alhagi pseudoalhagi* and *Vigna radiata* under salt stress[J]. Arid Zone Research, 2012,29(6):1039-1045.]

[23] 张金池,黄夏银,鲁小珍.徐淮平原农田防护林带杨树树干液流研究[J].中国水土保持科学,2004,2(4):21-25,36. [Zhang Jinchi, Huang Xiayin, Lu Xiaozhen. Stem sap flow poplar of sheiter-belt on farmland in Xu-Huai plain[J].Science of Soil and Water Conservation,2004,2(4):21-25,36.]

[24] 刘鑫.长三角典型造林树种蒸腾耗水规律研究[D].南京:南京林业大学,2014.[Liu Xin. Research on transpiration of typical tree species in the Yangtze river delta region[D]. Nanjing :Nanjing Forestry University,2014.]

[25]吴鹏,杨文斌,崔迎春,等.喀斯特区天峨槭(*Acer wangchii*)树干液流特征及其与环境因子的相关分析[J]. 生态学报,2017,37(22):7552-7567.[Wu Peng, Yang Wenbin, Cui Yingchun, et

al. Characteristics of sap flow and correlation analysis with environmental factors of acer *wangchii* in the karst area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017,37(22):7552-7567.]
[26] 王文杰,张哲,王维,等.流域生态健康评价框架及其评价方法体系研究(一)——框架和指标体系[J]. 环境工程技术学报,2012,2(4):271-277.[Wang Wenjie, Zhang Zhe, Wang Wei, et al. Framework and method system of watershed ecosystem health assessment(I) : framework and indicator system[J].Journal of Environmental Engineering Technology, 2012,2(4):271-277.]
[27] 李宏,刘帮,程平,等.不同灌水量下幼龄枣树茎流变化规律[J].干旱地区农业研究,2016,34(1):23-30.[Li Hong, Liu Bang, Cheng Ping, et al. Variability of young jujube tree sap flow under different irrigation amount[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016,34(1):23-30.]

Relationship between the characteristics of *Hippophae rhamnoides* fluid Flow and environmental factors under different irrigation gradients

WANG Zhuo[1], GUO Yue-feng[1*], YAO Yun-feng[1], QI Wei[1, 2], ZHONG Cheng[1], LIU Lu[1], WANG Jia-kun[1]

(1.Inner Mongolia Agricultural University, Institute of Desert Governance, Hohhot 010011, Inner Mongolia, China;
2. Inner Mongolia Water Resources and Hydropower Exploration and Design Institute, Hohhot 010020, Inner Mongolia, China)

Abstract: Chestnut soil developed with arsenic sandstone as its parent material was used as the tested soil and *Hippophae rhamnoides* was taken as the tested tree species to study the change characteristics of the fluid flow rates of *Hippophae rhamnoides* under different irrigation gradients T1 (Field water holding capacity θ_{FC}25%), T2 (θ_{FC}40%) and T3 (θ_{FC}55%) based on stem heat balance (SHB) method were studied in the greenhouse. A small HOBO weather station was used to monitor environmental factors and study the response of *Hippophae rhamnoides* fluid flow rate to environmental factors. Research shows:① While showing significant day-night changes, the fluid flow rate of *Hippophae rhamnoides* was accompanied by the phenomenon of "heat dormancy". The changing curve of fluid flow change was bimodal. ② The fluid flow rate of *Hippophae rhamnoides* was positively proportional to soil moisture content. Sap flow rate and daily accumulation are: T1 <T2 <T3, but the difference between T2 and T3 is small; ③ Under different irrigation gradients, the stem flow rate of *Hippophae rhamnoides* was positively correlated with photosynthetically active radiation and air temperature, and negatively correlated with air humidity. The absolute value of correlation between fluid flow rate and environmental factors under different irrigation gradients was :T1＜T3＜T2. The regression equation R^2 was :T1＜T3＜T2. The *Hippophae rhamnoides* sap flow rate was maintained at a high level under the T2 gradient, and the degree of response to environmental factors was the highest. Temperature is the leading factor affecting the fluid flow rate of *Hippophae rhamnoides*.

Keywords: arsenic sandstone; *Hippophae rhamnoides*; fluid flow rate; irrigation gradient; environmental factors; Inner Mongolia